

ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ СО ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

А.А.Богатов, С.С. Пузырев
ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

При обработке металлов давлением различают монотонную, квазimonотонную и знакопеременную виды деформации [1]. Необходимость предлагаемой классификации вызвана различием механического поведения деформируемого тела. При знакопеременной деформации вследствие эффектов Баушингера, Мазинга и циклического разупрочнения сопротивление деформации σ_s меньше, чем при монотонной деформации. Этот экспериментальный факт нуждается в обобщении с помощью новых моделей упрочнения. При оценке значения накопленной деформации нередко используют характеристики, рассчитанные по формуле, справедливой для монотонной деформации, по конечному формоизменению частицы, или еще хуже, всей заготовки без учета немонотонности и неоднородности деформации по объему. В литературе отсутствуют сведения об ошибке вычисления степени деформации.

1. Особенности формоизменения материальной частицы

Под воздействием инструмента при обработке металлов давлением некоторая материальная частица M совершает движение по траектории M_0MM_1 (рис.1), которую находят экспериментально или в результате решения краевой задачи. Традиционно при решении задачи пользуются либо эйлеровой, либо лагранжевой системой координат. В работе деформация материальной частицы рассмотрена в сопутствующей системе координат, построенной на базисе собственных векторов тензора скорости деформации $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ и перемещающейся вместе с частицей вдоль траектории. Отметим, что выбор системы координат не может повлиять на инвариантные характеристики движения частицы: траектория движения, интенсивность скорости деформации сдвига (H); показатель Лоде (μ_ξ), скорость относительного изменения объема (ξ); компоненты тензора скорости вращения частицы относительно собственных векторов тензора скорости деформации ($\dot{\Phi}_i$), а также степень деформации сдвига, накопленная частицей за время от $\tau = 0$ до $\tau = t$:

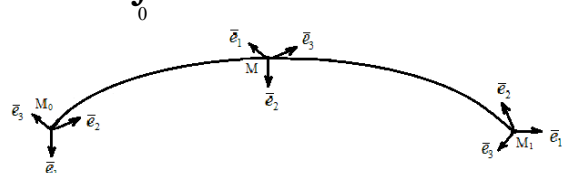
$$\Lambda = \int_0^t H d\tau, \quad (1)$$


Рис.1. Схема движения материальной частицы M вдоль траектории M_0MM_1 и положения подвижной системы координат в точках $M_0 (\tau = 0)$, $M (\tau = t)$ и $M_1 (\tau = t_1)$

В механике обработки металлов давлением используется понятие монотонной деформации, для которой скорости относительного изменения

длин отрезков в направлениях единичных векторов $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ характеризуются параметрами с постоянными во времени их соотношениями. Таким образом, деформация называется монотонной, если угловые скорости вращения частицы в сопутствующей системе координат равны нулю: $\dot{\Phi}_i = 0$. Для несжимаемой среды деформация частицы характеризуется двумя значениями главных компонент тензора конечной деформации $\bar{\epsilon}_1 = \ln \frac{a}{d}$ и $\bar{\epsilon}_3 = \ln \frac{b}{d}$, где d – характерный размер частицы до деформации, a и b – длины отрезков в направлении \bar{e}_1 и \bar{e}_3 после деформации. Степень деформации в этом случае можно подсчитать по формуле

$$\Lambda = 2\sqrt{\bar{\epsilon}_1^2 + \bar{\epsilon}_1\bar{\epsilon}_3 + \bar{\epsilon}_3^2}. \quad (2)$$

Для монотонной деформации расчеты по формулам (1) и (2) дают одинаковый результат.

В случае, если в интервале $0 \leq \tau \leq t_1$ знак угловых скоростей вращения материальной частицы относительно единичных векторов \bar{e}_1, \bar{e}_2 и \bar{e}_3 постоянен $\text{sign} \dot{\Phi}_i = \text{const}$, деформацию называют квазimonотонной. Примером такой деформации является кручение цилиндрического образца (рис.2). Если диаметр D и длина образца L при испытании остаются неизменными, а радиусы не искривляются, то имеет место простой сдвиг. Тензор скорости деформации при кручении цилиндрического образца характеризуется единственной

компонентой $\xi_{x\varphi} = \frac{1}{2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial x}$ (остальные компоненты равны нулю), а интенсивность

скорости деформации сдвига равна $H = \frac{\partial v_\varphi}{\partial x}$.

Окружная скорость произвольной частицы образца, один конец которого неподвижен, а

другой вращается с угловой скоростью ω , равна $v_\varphi = \omega \frac{2r}{D} \frac{x}{L}$, где D и L - диаметр и длина рабочей части образца (рис.2а). Тогда степень деформации сдвига нетрудно подсчитать по формуле (1). После интегрирования найдем

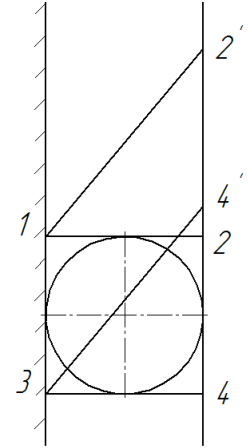
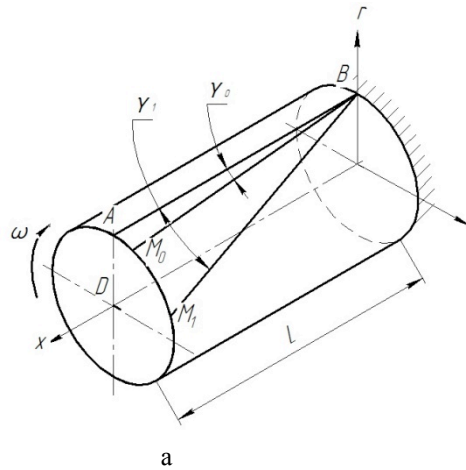


Рис.2. Схемы испытания образца (а) и локализованной пластической области (б) при кручении

На схеме испытания образца на кручение (рис.2.б) показана развертка цилиндрической поверхности локализованной пластической области шириной d с элементом в виде квадрата стороной d и в виде круга с диаметром d . После закручивания сторона квадрата 1-3 остается неподвижной, а сторона 2-4 переместится в положение 2' - 4', образуя параллелограмм 132'4' с углом простого сдвига γ . Степень деформации сдвига в результате кручения образца равна $\Lambda = tg\gamma$, а угол жесткого поворота элемента вокруг единичного вектора \bar{e}_2 , совпадающего с радиальной координатой r , равен $\Phi_2 = 0,5\gamma$. Единичные векторы \bar{e}_1 и \bar{e}_3 наклонены к оси образца под углом $\pm \pi/4$ и все время испытания образца не изменяются. Таким образом,

$sign\dot{\Phi}_2 = const$. Материальная частица вращается относительно \bar{e}_2 против часовой стрелки, поэтому $\dot{\Phi}_2 > 0$. В направлении единичного вектора \bar{e}_1 скорость изменения длины отрезка имеет максимальное (ξ_1), а в направлении единичного вектора \bar{e}_3 - минимальное (ξ_3) значения. Но поскольку частичка вращается относительно \bar{e}_2 , то формоизменение ее по сравнению с монотонной деформацией будет отличаться. Значения степени деформации сдвига, рассчитанные по формулам (1) - Λ_1 и (2) - Λ_2 , также будут отличаться (рис.3).

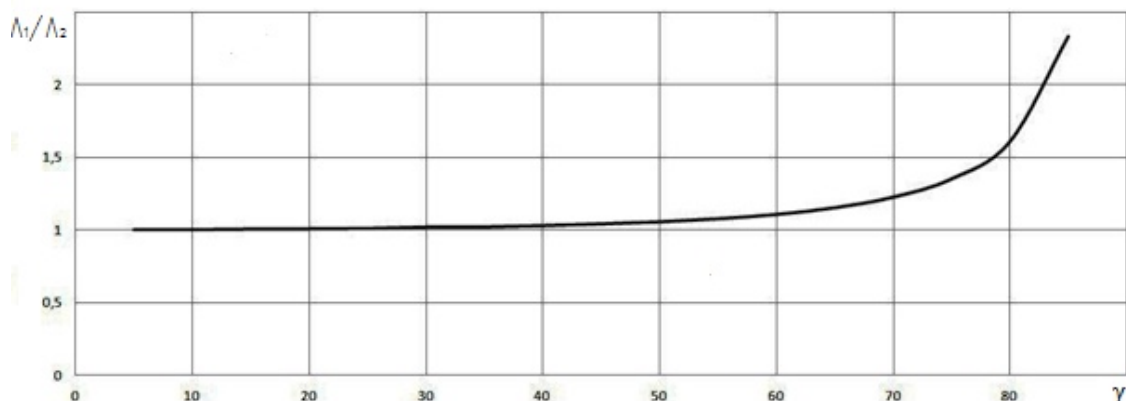


Рис.3. Отношение значений степени деформации сдвига при кручении, найденные по формулам (1) и (2), в зависимости от угла сдвига γ

Видно, что с увеличением угла γ отношение Λ_1/Λ_2 растет. Так, при $\gamma=65^\circ$, $\Lambda_1=2,145$, $\Lambda_2=1,72$, а отношение равно 1,245; при $\gamma=80^\circ$, $\Lambda_1=5,67$, $\Lambda_2=3,50$, а отношение равно 1,62; при $\gamma=85^\circ$, $\Lambda_1=11,43$, $\Lambda_2=4,88$, а отношение равно 2,34. Еще большая разница значений Λ_1 и Λ_2 характерна для знакопеременной деформации при кручении. Для знакопеременной деформации знак скорости вращения частицы относительно вектора \bar{e}_2 будет переменным: $\text{sign}\dot{\Phi}_2 = \text{var}$. При закручивании образца на первом этапе квадратный элемент изменит форму до параллелограмма 132'4' и $\dot{\Phi}_2 > 0$, при раскручивании образца на втором этапе $\dot{\Phi}_2 < 0$, а элемент восстановит форму квадрата. Таким образом, в результате двух этапов знакопеременной деформации $\Lambda_1 = 2\text{tg}\gamma$, а степень деформации сдвига, рассчитанная по конечному формоизменению образца по формуле (2), $\Lambda_2=0$. Отметим, что знакопеременная деформация характеризуется амплитудой Λ_i и числом этапов n . Если число этапов $n=1$, то деформация является либо монотонной ($\dot{\Phi}_2 = 0$), либо квазимоноотонной ($\text{sign}\dot{\Phi}_2 = \text{const}$).

2. Сопротивление деформации

В механике обработки металлов давлением применяется гипотеза «единой кривой», согласно которой ни характеристики напряженного состояния, ни вид деформации (монотонная, или знакопеременная) не оказывают влияние на кривую упрочнения. Опыты не всегда подтверждают гипотезу. При одноосном

растяжении или сжатии деформация является монотонной, а при кручении – квазимоноотонной. Показатели напряженного состояния во всех случаях имеют разные значения: при одноосном растяжении $\frac{\sigma}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}}$, $\mu_\sigma = -1$; при кручении

$\frac{\sigma}{T} = 0$, $\mu_\sigma = 0$; при одноосном сжатии

$\frac{\sigma}{T} = -\frac{1}{\sqrt{3}}$, $\mu_\sigma = 1$. Здесь $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ – среднее

нормальное напряжение, а $T = (\frac{1}{2}S_{ij}S_{ij})^{1/2}$ –

интенсивность касательных напряжений, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}$ – компоненты девиатора

напряжений, μ_σ – показатель Лоде. Для проверки гипотезы «единой кривой» были поставлены

опыты по нагружению тонкостенных труб осевой силой, крутящим моментом и внутренним давлением. С этой целью А.А.Жуковым в опытах поддерживалось постоянное отношение осевой силы P и внутреннего давления p , так что

величина σ_1/σ_2 в опыте была неизменной.

Однако от опыта к опыту величину σ_1/σ_2

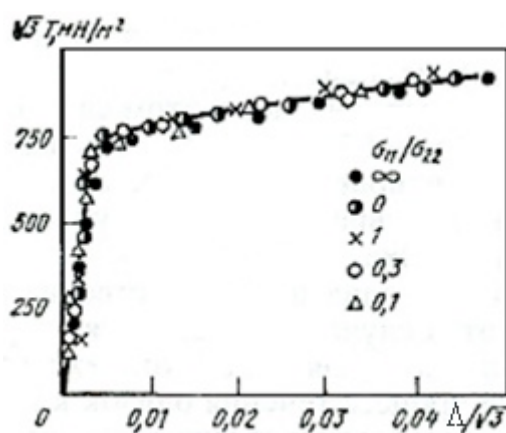
изменяли и придавали отношению значения 0; 0,1; 0,3; 1,0 и ∞ . Регистрировались также размеры трубы и вычислялись относительные деформации

ε_1 , ε_2 и ε_3 , показатель Лоде μ_ε и степень деформации сдвига Λ , а также напряжения σ_1 ,

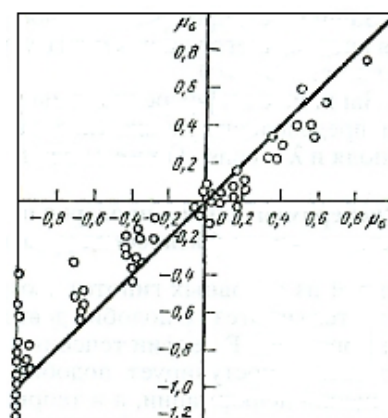
σ_2 и σ_3 , показатель Лоде μ_σ и интенсивность

касательных напряжений T . Опытные точки для всех экспериментов с различным значением

отношения σ_1/σ_2 легли около кривой упрочнения $T(\Lambda)$ (рис.4а) [2].



а



б

Рис.4. Опытные данные по проверке гипотезы «единой кривой» (а) и гипотезы пропорциональности девиаторов напряжений и приращения деформаций (б) [2]

При формулировке определяющих соотношений механики пластически

деформируемого тела используется гипотеза пропорциональности девиаторов напряжений и

скоростей деформаций, т.е. $\mu_\sigma = \mu_\xi$. Опытные точки, полученные В. Лоде, показали, что гипотеза выполняется для случая простого сдвига, при линейном растяжении или сжатии наблюдается некоторое систематическое отклонение от прямой $\mu_\sigma = \mu_\xi$ (рис.4б). Таким образом, гипотезы «единой кривой» и пропорциональности девиаторов напряжений и приращения деформаций справедливы как для монотонной, так и квазимоноотонной деформации при различных значениях показателей

напряженного состояния $\frac{\sigma}{T}$, μ_σ . Для знакопеременной деформации гипотеза «единой кривой» не выполняется. Об этом свидетельствуют результаты опытов по кручению трубчатых образцов из стали, полученные А.Надаи (рис.5):

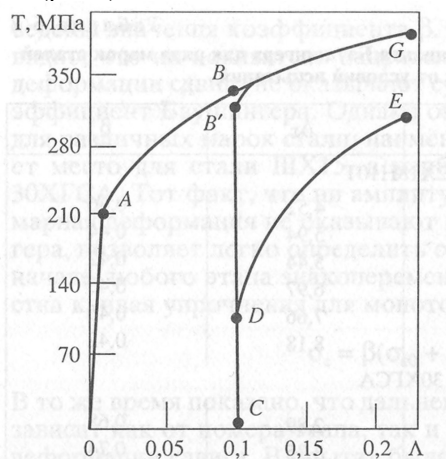


Рис. 5. Эффект Баушингера при знакопеременном кручении [2]

Точка А соответствует началу пластической деформации. После достижения деформации сдвига $\Lambda_1 = 0,1$ (точка В на диаграмме), образец разгружали, затем закручивали в прежнем направлении. Кривая упрочнения $CB'G$ является продолжением кривой упрочнения AB . Если повторное кручение производить в обратном направлении, то кривая упрочнения CDE лежит ниже кривой ABG . Отношение отрезков $\frac{CD}{CB} = \frac{\sigma_{s20}}{\sigma_{s1}}$ называется коэффициентом Баушингера. Эффект Баушингера объясняется различным характером развития дислокационной структуры при монотонной и знакопеременной деформациях. Для изучения влияния условий нагружения в диапазоне развитых пластических деформаций на коэффициент Баушингера были проведены эксперименты по знакопеременному кручению образцов из пяти марок стали под различным гидростатическим давлением жидкости в испытательной камере. После закручивания образцов, на разное число этапов n со значениями амплитуды Λ_i определяется суммарная деформация $\Lambda_n = \sum_{i=1}^n \Lambda_i$, затем проводится

дополнительное закручивание образцов в том же направлении, что и на последнем n -ом этапе, и в противоположном направлении с целью определения σ_{s1} и σ_{s20} . Коэффициент Баушингера рассчитывается по формуле $\beta = \frac{\sigma_{s20}}{\sigma_{s1}}$. В табл. 1 приведены значения коэффициента β [1]. Из анализа данных таблицы видно, что ни показатель напряженного состояния, ни степень деформации сдвига не оказывают существенного влияния на коэффициент Баушингера. Однако он имеет различные значения для разных марок стали: наименьшее значение $\beta = 0,40$ характерно для стали ШХ15, а наибольшее $\beta = 0,71$ - для стали 30ХГСА. Тот факт, что ни амплитуда, ни число этапов, ни суммарная деформация не оказывают влияние на эффект Баушингера, позволяет легко определить сопротивление деформации в начале любого этапа знакопеременной деформации, если известна кривая упрочнения для монотонной деформации:

$$\sigma_s = \beta(\sigma_{s0} + g \Lambda^6). \quad (6.17)$$

В то же время показано, что дальнейший ход кривой упрочнения зависит как от номера этапа, так и от предварительной степени деформации сдвига. В опытах было установлено, что интенсивность упрочнения в начальной стадии деформации при увеличении номера этапа все возрастает (эффект Мазинга). Кривая упрочнения при знакопеременной деформации проходит вследствие эффекта циклического разупрочнения металла ниже той, которая получена при монотонной деформации.

Для изучения эффектов Баушингера, Мазинга и циклического разупрочнения металла в процессах обработки металлов давлением были построены кривые упрочнения металла, полученные после холодной прокатки труб и волочения проволоки, в сравнении с кривой упрочнения исследованных марок стали, полученной при монотонной деформации.

Образцы растягивали на различную степень деформации сдвига $\Lambda_i = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_i}$ и фиксировали соответствующее ей значение силы растяжения образца P_i . Здесь d_0 и d_i – диаметр образца до и после i -го испытания. При больших значениях Λ_i на образце образовывается шейка, характеризуемая отношением диаметра d_i и радиусом контура шейки R_i (d_i/R_i). Отношение

d_i/R_i в процессе испытания изменяется, увеличиваясь с ростом степени деформации сдвига. Характер изменения d_i/R_i

экспериментально был исследован П. Бриджменом, результаты эксперимента были аппроксимированы зависимостью $d/R = (\Lambda - \Lambda_*)^\alpha$, где Λ_* – степень

деформации сдвига, соответствующая моменту образования шейки образца при растяжении

цилиндрического образца [1], α – константа материала.

Таблица 1

Результаты определения коэффициента Баушингера для нескольких марок сталей в зависимости от условий испытаний

n	p, МПа	Λ_{Σ}	β
12X18H10T			
5	0,1	4,52	0,46
7	200	5,94	0,44
6	300	5,44	0,42
7	400	6,97	0,45
7	600	7,66	0,45
6	800	8,18	0,42
30ХГСА			
4	0,1	2,89	0,68
8	0,1	3,35	0,74
5	200	5,34	0,68
11	200	5,80	0,77
15	400	8,3	0,66
n	p, МПа	Λ_{Σ}	β
ШХ15			
10	0,1	5,78	0,40
7	400	6,14	0,40
8	800	8,99	0,40
8,0	800	8,99	0,40
12Х1МФ			
7	0,1	7,57	0,69
7	200	5,20	0,71
7	300	9,77	0,70
7	500	10,58	0,69
Ст45			
6	0,1	4,58	0,50
7	300	5,58	0,55
6	800	9,33	0,53

Экспериментально найденное значение силы P_i можно поставить в соответствие расчетному $P_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \sigma_{s_i} (1 + \frac{1}{8} \frac{d_i}{R_i})$ [1]. Таким образом в результате обработки опытных данных находятся пары значений σ_{s_i} и Λ_i , которые определяют кривую упрочнения.

Кривые упрочнения были получены в опытах на растяжение образцов, вырезанных соответственно из труб и проволоки в исходном состоянии (кривая 1), после первого (кривая 2) и второго (кривая 3) проходов холодной прокатки труб и волочения проволоки (рис. 6).

При изображении на рис. 6 кривых упрочнения 2 и 3 учитывалась степень предварительной деформации при прокатке и волочении, а кривые сдвигались вправо по оси абсцисс на соответствующую величину Λ_{01} и Λ_{02} . Известно, что деформация труб на станах ХПТ и

проволоки при волочении является знакопеременной [4]. Характер кривых упрочнения на рис.6 подтверждает установленные ранее эффекты Баушингера, Мазинга и циклического разупрочнения [1,4]. Действительно, начало пластической деформации образцов после первого и второго проходов прокатки и волочения наступает при напряжении, меньшем напряжения, соответствующего кривой упрочнения при монотонной деформации (кривая 1) в коэффициент Баушингера раз. Коэффициент Баушингера, определенный таким образом, для сталей марок 12Х18Н10Т и СтЗсп соответственно равен 0,46 и 0,52, что согласуется с данными табл. 1. Для кривых упрочнения 2 и 3 по сравнению с кривой 1 характерно возрастание интенсивности упрочнения в начальной стадии испытания образцов, что соответствует известному эффекту Мазинга. Кривые упрочнения 2 и 3, полученные после первого и второго проходов прокатки и волочения, лежат ниже

кривой 1, полученной при монотонной деформации, соответственно на величины $\Delta\sigma_{s1}$ и $\Delta\sigma_{s20}$, характеризующих циклическое разупрочнение сталей при знакопеременной деформации.

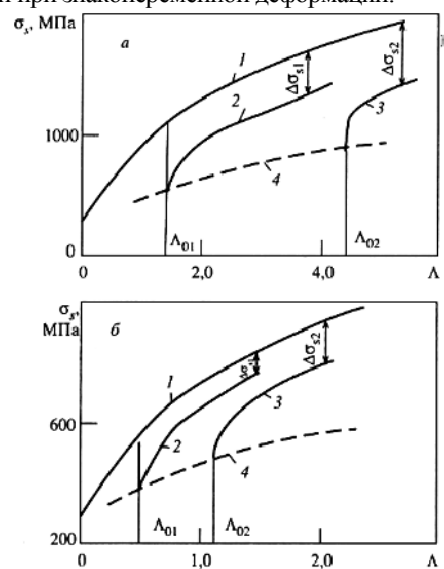


Рис. 6. Упрочнение стали 12Х18Н10Т (а) и Ст 3сп (б) в исходном состоянии (1), после первого (2) и второго (3) проходов холодной прокатки труб (а) и волочения проволоки (б), 4 - кривая упрочнения по методике Зюзина-Третьякова [1].

Заключение

Получены экспериментальные данные о закономерностях формоизменения и упрочнения металла при холодной обработке металлов

давлением. Показано, что расчет степени накопленной деформации по конечному формоизменению частицы дает точный результат, только для монотонной деформации. Наибольшую интенсивность деформационного упрочнения металла наблюдают при монотонной деформации. При знакопеременной деформации на характер кривых упрочнения значительное влияние оказывают эффекты Баушингера, Мазинга и циклического разупрочнения. Обеспечивая знакопеременный характер и уменьшая амплитуду деформации при разработке инновационных технологических процессов можно достичь значительного энергосбережения за счет уменьшения сопротивления деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металла. Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2002.-328с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2001.-835с.
3. Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1974.-222с.
4. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1983.-144с.